Fortgeschrittene geodätische Deformationsanalyse

Walter Welsch

Hintergrund

Nach klassischem Verständnis ist der Gegenstand geodätischer Überwachungsmessungen die Erfassung geometrischer Veränderungen eines Meßobjekts. Unter geometrischen Veränderungen werden Bewegungen und Verformungen des Überwachungsobjektes verstanden. Bedenkt man jedoch, daß zu den Zielsetzungen geodätischer Überwachungsmessungen u.a. auch die Möglichkeit der Prognose des mutmaßlichen Objektverhaltens in der näheren Zukunft und des Verhaltens unter bestimmten Lastfällen gehört, greift die klassische Definition zu kurz. Die Prognose eines noch nicht eingetretenen Verhaltens setzt voraus, daß gewisse Gesetzmäßigkeiten der Objektreaktion in den Analyseprozeß miteinbezogen werden müssen. Diese Gesetzmäßigkeiten betreffen zum einen die Einflußgrößen, die auf das Objekt wirken, und zum anderen die Auswirkung der Einflußgrößen, die sich infolge der Struktur des Objekts auf seine geometrischen Eigenschaften ergibt. Folgt man dieser erweiterten Definition der geodätischen Deformationsanalyse, so bedeutet diese die Beobachtung und die quantitative, zumindest aber qualitative Bewertung des gesamten Deformationsprozesses. Man kann auch sagen, geodätische Deformationsanalyse bedeutet die geodätische Analyse eines Deformations- oder allgemeiner eines dynamischen Prozesses.

Hierzu sind besondere Modelle und Analysemethoden bereitzustellen. Sie werden im folgenden in der gebotenen Kürze besprochen.

Klassische Deformationsanalyse

Deformation:
Bewegung und Verformung eines Objektes

Abb. 1: Konventionelle Deformationsanalyse im „Deformationsraum“

Die klassische Deformationsanalyse untersucht die Bewegung und Verformung eines Objekts in Raum und Zeit. Ihre Bestandteile sind die Ermittlung der Deformation durch Beobachtung und die Auswertung der Beobachtungen.

An das Meßkonzept werden räumliche und zeitliche Forderungen gestellt. Das Kontinuum des zu untersuchenden Objekts ist in Einzelpunkte aufzulösen (zu diskretisieren) so, daß die Bewegungen der Punkte die Bewegungen und Verformungen des Objektes zutreffend (repräsentativ) beschreiben (charakteristische Punkte). Die Beobachtung oder Abtastung dieser Punkte ist so zu terminieren, daß auch zeitlich nicht-lineare Verformungen erfaßt werden können. Beide Forderungen an das Meßkonzept verlangen zumindest qualitative à priori Informationen über das Objektverhalten.

Die Auswertung der Beobachtungen führt zu rein deskriptiven Aussagen über die Punktbewegungen in Raum und Zeit auch dann, wenn die Bewegungen mathematisch-statistisch analysiert und modelliert werden, um das Verformungsverhalten des Objektes als Ganzes aufzuzeigen. Die Analyse in der Zeit schließt auch das Verhalten im Frequenzbereich ein.

Die klassische Deformationsanalyse verläßt bei all ihren Untersuchungen nicht den "Deformationsraum" des untersuchten Objekts, den sie phänomenologisch beschreibt (WELSCH 1981).

Möglichkeiten und Ziele zeitgemäßer geodätischer Überwachungsmessungen

Dem heutigen Selbstverständnis der Geodäsie genügt es jedoch nicht mehr, die Deformation eines Körpers lediglich zu beschreiben. Die Ergebnisse der Deformationsuntersuchungen sollen vielmehr in einen größeren Zusammenhang eingebettet werden, da sie nicht Selbstzweck, sondern ein Werkzeug zur Beobachtung und Analyse natur- und ingenieurwissenschaftlicher Phänomene sind (Welsch et al. 1999).

Die Deformation eines Körpers ist das Ergebnis eines Prozesses, eines „Spiels der Kräfte“. Es gilt, dies Spiel der Kräfte, die Dynamik des Prozesses, zu analysieren. Grundlage der Untersuchungen sind neben den ermittelten Verformungen die beeinflussenden Kräfte und bekannte oder zu ermittelnde Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten des untersuchten Objekts. Die Geodäsie, vornehmlich die Ingenieurvermessung, ist von der zeitlich-räumlichen Beschreibung der Bewegungen und Verformungen eines Objekts zur Erforschung der Prozesse, denen der Körper unterworfen ist, fortgeschritten (Chrzanowski und Chen 1986, 1990). Die Aufgabe erfordert eine fachübergreifende Integration von Methoden, die geeignet sind, „dynamische Systeme“ zu beschreiben.

verursachende Kräfte: Eingangssignal	Übertragung durch das Objekt	Deformation: Ausgangssignal

Abb. 2: Deformation als ein Element eines dynamischen Prozesses

Recherchiert man in diesem Sinne die einschlägige Literatur der vergangenen Jahre, so kristallisieren sich vier Gruppen von Analysemodellen heraus, die geeignet sind, in fortschreitender Komplexität die Aufgaben geodätischer Deformationsuntersuchungen zu lösen:

<table>
<tr><th>Deformations-modell</th><th>Kongruenz-modell</th><th>kinematisches Modell</th><th>statisches Modell</th><th>dynamisches Modell</th></tr>
<tr><td>Faktor Zeit</td><td>keine Modellierung</td><td>Deformationen als Funktion der Zeit</td><td>keine Modellierung</td><td rowspan="2">Deformationen als Funktion der Zeit und der Belastung</td></tr>
<tr><td>verursachende Kräfte</td><td>keine Modellierung</td><td>keine Modellierung</td><td>Deformation als Funktion der Belastung</td></tr>
<tr><td>Zustand des Objekts</td><td>hinreichend in Ruhe</td><td>permanent in Bewegung</td><td>unter Belastung hinreichend in Ruhe</td><td>permanent in Bewegung</td></tr>
</table>

Abb. 3: Klassifizierung von Deformationsmodellen

Das Ziel der Überwachung ingenieur- und geotechnischer Phänomene ist also nicht nur die Beantwortung der Frage nach den geometrischen Veränderungen, die die untersuchten Objekte erfahren haben, sondern auch die Klärung der Ursachen, die dazu geführt haben, und schließlich - aufbauend auf der Kenntnis des Übertragungsverhaltens - die Prognosebildung.

Charakterisierung der Modelle

Die Charakterisierung der Auswertemodelle von Überwachungsmessungen und ihre Systematisierung sind in der jüngeren Vergangenheit wiederholt Gegenstand von Untersuchungen gewesen (Pfeufer 1993; Heunecke 1995; Welsch 1996; Jaeger et al. 1997; Heunecke, Pelzer 1998; Heune-

CKE et al. 1998; MILEV, PAPO 1998; LEVENHAGEN 1998). Da zu überwachende Meßobjekte als dynamische Systeme betrachtet werden können, bietet es sich an, sich an der Vorgehensweise der Systemtheorie zu orientieren. Hauptaufgabe der Systemtheorie ist es gerade, für die in der Realität existierenden Systeme Modelle bereitzustellen, die die Eigenschaften des Systems entsprechend den Zielsetzungen der Betrachtung idealisieren, repräsentieren und analysieren, um so zu Erkenntnissen über das Systemverhalten zu gelangen und quantitative Ergebnisse zu erzielen (Systemidentifikation).

Dynamische Systeme im allgemeinen Sinne der Systemtheorie sind Systeme (Objekte), die Energie speichern und zeitverzögert abgeben können, wobei es bei der Auswertung nur möglich ist, die Vergangenheit (das Gedächtnis) bis zu einem festzulegenden Zeitpunkt zu berücksichtigen. Ein Spezialfall liegt vor, wenn das System (im Modell) verzögerungsfrei (gedächtnislos) in einen neuen Gleichgewichtszustand übergeht. Die Ausgangsgröße ist dann nur von Eingangsgrößen zum selben Zeitpunkt, eventuell unter vorhergehender Abspaltung einer Verzögerungszeit, abhängig. Gemeinhin wird dann von einem statischen oder gedächtnislosen System gesprochen.

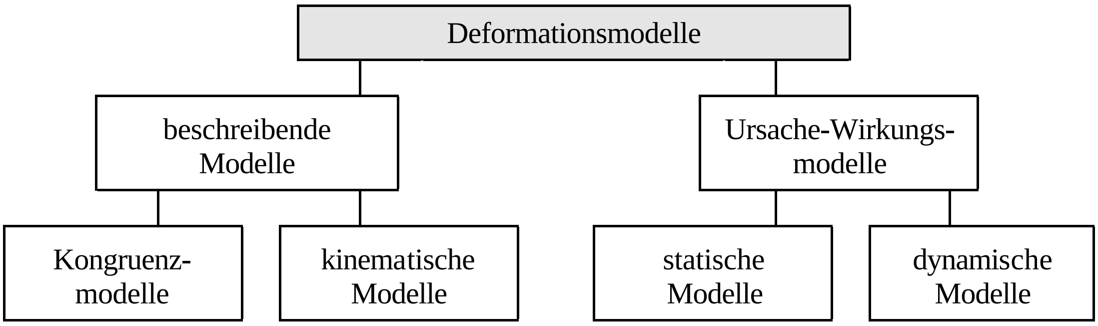

Abb. 4: Hierarchie der Modelle zur geodätischen Deformationsanalyse

Beide, dynamische und statische Systeme, verlangen das Modellieren der deterministisch wirkenden Eingangsgrößen, der sog. Stellgrößen. Systeme, die ohne Betrachtung der auf sie wirkenden Eingangsgrößen untersucht werden sollen, sind weitere Spezialfälle. Systeme, deren Reaktion als reine Funktion der Zeit dargestellt werden, sind kinematische Systeme. Ein System, für dessen Größen kein Bewegungsgesetz aufgestellt werden kann, wird als „random walk"-System bezeichnet; in der geodätischen Deformationsanalyse wird es im Kongruenzmodell beschrieben.

In dieser Kategorisierung der Abbildung 4 kommt die Dreiteilung von Bewegungszuständen in der Mechanik zum Ausdruck:

- Kinematik: Beschreibung von Bewegungsvorgängen ohne Berücksichtigung ihrer Entstehung
- Statik: Lehre von den Gleichgewichtsbedingungen, unter denen sich die unter Einwirkung von Kräften stehenden Körper in Ruhe befinden
- Dynamik: Betrachtung von Bewegungsvorgängen in Zusammenhang mit den sie verursachenden Kräften.

Die wesentlichen Inhalte und Aufgaben der Modelle für die Auswertung von Überwachungsmessungen lassen sich demnach wie folgt zusammenstellen:

- Kongruenzmodelle: Gegenstand der Betrachtung ist der rein geometrische Vergleich des Zustandes eines Objekts (im Extremfall einer einzelnen Koordinate) zu einem Zeitpunkt mit demjenigen eines anderen Zeitpunktes. Neben der Untersuchung der Kongruenz oder Identität der Geometrie sind darüber hinaus zusätzliche Betrachtungen zur Generalisierung aufgetretener Verformungen durch affinen Abbildung des Meßobjektes (Strainanalyse) oder auch durch Polynomansätze häufig Gegenstand dieser Modellklasse. Die Generalisierung leitet von einer zunächst punktweisen Untersuchung zur einer kontinuierlichen Betrachtung über.

- Kinematische Modelle: Zweck ist die rein zeitabhängige Beschreibung des Verhaltens von Objektpunkten, insbesondere durch Polynomansätze oder trigonometrische Funktionen, wobei deren Anwendung bereits die Kenntnis gewisser theoretischer Zusammenhänge bedingt. Ziel ist es letztlich, von den Messungen zu bestimmten diskreten Zeitpunkten auf die Objektbewegung und ihre Parameter im allgemeinen zu schließen (Zeitreihenanalyse; KUHLMANN 1996). Ein (quantitativer) Zusammenhang mit ursächlichen Belastungen wird nicht hergestellt, die Analyse des Bewegungsverhaltens erfolgt deskriptiv. Auch hier stellt sich das Generalisierungsproblem, wenn ausgehend von den zunächst einzeln betrachteten Objektpunkten das Meßobjekt als Ganzes über der Zeitachse zu betrachten ist.
- Statische Modelle: Ein statisches Auswertemodell beschreibt den funktionalen Zusammenhang zwischen der Beanspruchung eines Meßobjektes und seiner Reaktion (KERSTING 1992). Zum Zeitpunkt der Messungen muß sich das Objekt hinreichend in Ruhe befinden, so daß die Zeit im Modell nicht explizit zu berücksichtigen ist.
- Dynamische Modelle: Gegenstand des dynamischen Auswertemodells ist die Betrachtung von Objektreaktionen als Funktion der Zeit und der Beanspruchung.

Die zur Verfügung stehenden Methoden und Modelle zur Auswertung von Überwachungsmessungen umfassen ein weites Spektrum. Bei der Bearbeitung einer konkreten Aufgabenstellung kommt es darauf an, die geeigneten „Werkzeuge“ auszuwählen und einzusetzen. In Kombination mit der der Problemstellung adäquaten Meßtechnik ist die Auswahl bereits ein wesentlicher Bestandteil der Analyse. Dabei sollte der Grundsatz gelten, einfache Fragen mit einfachen Vorgehensweisen zu lösen.

Strukturmodelle und Verhaltensmodelle

Bei der Analyse der Kausalkette eines dynamischen Systems sind zwei Vorgehensweisen zu unterscheiden, die auf die Begriffe der Struktur- und Verhaltensmodelle beziehungsweise der parametrischen und nichtparametrischen Modelle führen. Der Begriff Struktur beziehungsweise Strukturmodell steht hier für den geordneten, räumlich und physikalisch definierten inneren Aufbau eines Systems. Statische Modelle sind immer Strukturmodelle.

Während bei Strukturmodellen das Übertragungsverhalten in physikalisch interpretierbarer Form vorliegt, wird ein Zusammenhang zwischen einer Eingangsgröße und einer Ausgangsgröße in Verhaltensmodellen rein mathematisch über Regressions- oder Korrelationsbetrachtungen hergestellt. Aussagekräftiger sind zweifelsfrei Strukturmodelle, also Modelle, die im Sinne eines „model approach“ von theoretischen Vorstellungen über das System ausgehen und diese über Messungen verifizieren.

Wird bei der parametrischen Systemidentifikation lediglich die Zeitabhängigkeit des Prozesses, dem das System unterliegt, bedacht, nicht jedoch dessen Ortsabhängigkeit, wird das System durch "konzentrierte" Parameter beschrieben. Es genügen gewöhnliche Differentialgleichungen.

Die Differentialgleichung der linearen Elastodynamik ist die Grundgleichung eines durch konzentrierte Parameter zu beschreibenden dynamischen Modells ("white box" - Modell):

$$\begin{vmatrix} \boldsymbol{K} & \boldsymbol{D} & \boldsymbol{M} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \boldsymbol{x}\ (t) \\ \dot{\boldsymbol{x}}\ (t) \\ \ddot{\boldsymbol{x}}\ (t) \end{vmatrix} = \boldsymbol{y}\ (t)$$

y(t) ist hierin der Systemeingang, ***x(t)*** mit seinen Ableitungen ist der (geodätisch zu beobachtende) Systemausgang; in den Matrizen ***K***, ***D*** und ***M*** sind z.B. im Falle einer Problemstellung aus dem Gebiet der Mechanik Material- bzw. Entwurfsparameter für Steifigkeit, Dämpfung und Masse eines Bauwerks enthalten. Je nach Aufgabenstellung können einzelne Parameter- und Beobachtungsgruppen entfallen. Bei der Untersuchung von Eigenschwingungen entfällt etwa die Dämpfungsmatrix, bei langsamen Verformungen kann die Masse außer acht gelassen werden.

Der Spezialfall

$$\boldsymbol{K}\,\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{y}(t)$$

ist erheblich, da er die grundlegende Beziehung eines statischen Systems beschreibt, das nach Aufbringen einer Last in einen neuen Gleichgewichtszustand mit $\boldsymbol{y}(t)$ = const. übergeht.

Mit

$$\boldsymbol{x}(t) = \text{const.}$$

ist als Trivialform auch das Identitätsmodell - etwa zur Überprüfung der Kongruenz eines geodätischen Netzes - im allgemeinen Ansatz enthalten.

Im Zusammenhang mit Strukturmodellen ist es von wesentlicher Bedeutung, daß zur Beschreibung von Deformationsvorgängen im Regelfall Koordinatensysteme als Bezugssysteme eingeführt werden. In den meisten Fällen dienen Koordinaten als Zwischengrößen der Auswertung. Zwischengrößen dieser Art werden in der Systemtheorie als Zustandsgrößen bezeichnet, der Unbekannten- oder Parametervektor demzufolge als Zustandsvektor. Außer Koordinaten können bei der Auswertung von Überwachungsmessungen auch weitere Zustandsgrößen auftreten. Die Zustandsgrößen dienen im systemtheoretischen Sinne der Beschreibung der „inneren Zusammenhänge des Systemverhaltens“. Sie sind geometrisch und physikalisch interpretierbare Größen und bilden den Zustandsraum. Die Analyse eines Strukturmodells setzt folglich auf der Zustandsraummethodik auf.

Wird bei der parametrischen Systemidentifikation neben der Zeitabhängigkeit auch eine Ortsabhängigkeit des Prozesses betrachtet, so ist das System durch verteilte Parameter zu beschreiben. Dies führt zu partiellen Differentialgleichungen. Durch Verfahren der Ortsdiskretisierung, die auf bereichsweisen Ansätzen aufbaut, wird es möglich, die partiellen durch Differentialgleichungen, die nur in einem beschränkten Definitionsbereich gültig sind, auszudrücken. Die für die einzelnen Definitionsbereiche gefundenen Lösungen sind unter Beachtung von Randbedingungen aneinanderzufügen und ergeben die genäherte Lösung der ursprünglichen Differentialgleichungen. Ein numerisches Verfahren für bereichsweise Ansätze, das sich für die Untersuchung ebener und räumlich ausgedehnter Objekte anbietet, ist die Methode der finiten Elemente (HEUNECKE 1996).

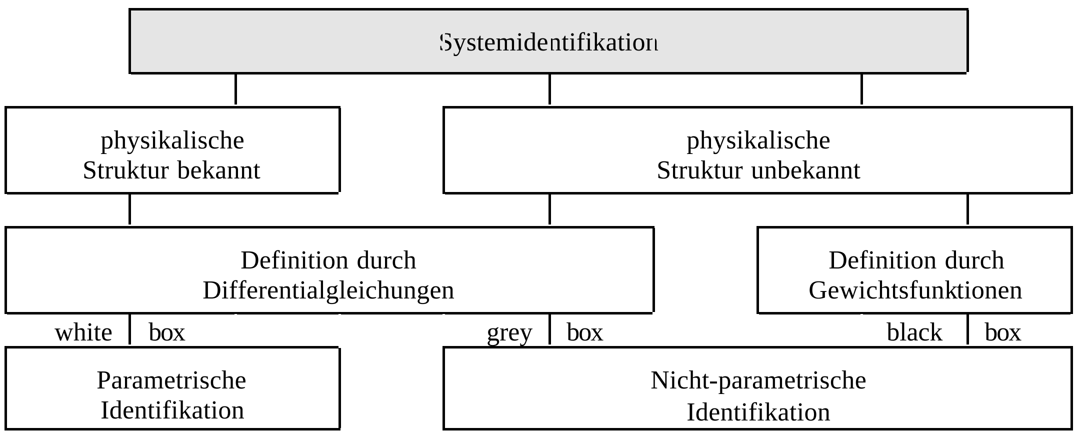

Abb. 5: Methoden der Systemidentifikation

Für viele praktische Problemstellungen ist festzuhalten, daß eine Formulierung physikalischer Zusammenhänge entweder nicht oder nur mit verhältnismäßig großem Aufwand möglich ist. In diesen Fällen sind Verhaltensmodelle eine häufig eingesetzte Alternative, bei denen im Sinne eines „operational approach“ allein aus der Beobachtung von Zeitreihen der Ein- und Ausgangsgrößen Erkenntnisse über das System abgeleitet werden sollen. An Stelle von Differentialgleichungen wird im linearen kontinuierlichen Fall auf eine Integralbeziehung in Form des eines Faltungsintegrals zurückgegriffen („black box“-Modell). Für den eindimensionalen Fall kann geschrieben werden (STROBEL 1975):

$$x(t) = \int_0^\infty g(\tau)\, y(t-\tau)\, d\tau \,.$$

Im Faltungsintegral ist $g(\tau)$ die sog. Gewichtsfunktion, deren zu ermittelnde Koeffizienten beschreiben, mit welchem Gewicht sich die Eingangsgrößen $y(t)$ auf die Ausgangsgröße $x(t)$ auswirken. Im nicht-linearen Fall kann das sog. VOLTERRA-Modell (WERNSTEDT 1989; PFEUFER 1990, 1993) verwendet werden:

$$\begin{aligned} x(t) = & \int_0^\infty g_1(\tau_1)\; y(t-\tau_1)\; d\tau_1 \\ & + \int_0^\infty \int_0^\infty g_2(\tau_1 \tau_2)\; y(t-\tau_1)\; y(t-\tau_2)\, d\tau_1\, d\tau_2 \\ & + \text{Glieder höherer Ordnung.} \end{aligned}$$

Zur Herstellung einer Beziehung zwischen einer Eingangs- und einer Ausgangsgröße kann auch ein mathematisches Modell der allgemeinen Form

$$\begin{aligned} & a_q \frac{d^q x}{dt^q} + a_{q-1} \frac{d^{q-1} x}{dt^{q-1}} + \ldots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = \\ & b_p \frac{d^p y}{dt^p} + b_{p-1} \frac{d^{p-1} y}{dt^{p-1}} + \ldots + b_1 \frac{dy}{dt} + b_0 y \end{aligned} \;.$$

oder die Differenzengleichung

$$x_k = a_1 x_{k-1} + a_2 x_{k-2} + \ldots + a_q x_{k-q} + b_0 y_k + b_1 y_{k-1} + \ldots + b_p y_{k-p}$$

verwendet werden.

Es handelt sich um das sog. ARMA (autoregressive moving average)-Modell. Typisch ist, daß mit $q>3$ und $p>0$ die physikalische Interpretation nicht mehr unmittelbar gegeben ist. Für $q \leq 3$ und $p = 0$ ist jedoch eine physikalische Deutung der Parameter möglich. Man spricht dann von „grey box“-Modellen.

Das ARMA-Modell besteht aus einem rekursiven und einem nicht-rekursiven Anteil:

$$x_k = \sum_{i=1}^{q} a_i\, x_{k-i} + \sum_{j=0}^{p} b_j\, y_{k-j} \;.$$

Für $p = 0$ ist das Modell autoregressiv: Die aktuelle Beobachtung wird als Linearkombination der zurückliegenden Ausgangssignale und des gegenwärtigen Eingangssignals angesehen. Für $q = 0$ wird das Modell nicht-rekursiv: Der aktuelle Systemausgang ist eine Linearkombination des gegenwärtigen und der zurückliegenden Systemeingänge (ELLMER 1987). Die Koeffizienten b_j können als Koeffizienten einer Regressionsanalyse betrachtet werden.

Verhaltensmodelle sind die nicht-parametrische Möglichkeit der Angabe eines Zusammenhanges zwischen den Eingangs- und den Ausgangsgrößen eines dynamischen Systems. Verhaltensmodelle sind universell und flexibel einsetzbar, da eine theoretische Systemanalyse weitgehend vermieden wird.

Kürzlich hat man gänzlich neue Analysetechniken der Steuer- und Regelungstechnik für geodätische Anwendungen übernommen: Neurale Netze und fuzzy-regelbasierte Modelle wurden für die Identifikation von Ein-Ausgangsmodellen getestet und nutzbar gemacht (HEINE, 1999).

Möglichkeiten und Ziele dynamischer Modellierungen

Zur Analyse technischer und natürlicher Phänomene ist aus vielen Gründen die Entwicklung und Anwendung dynamischer Modelle von großer Bedeutung; sie bieten die weitreichendsten Möglichkeiten bei der Analyse und Interpretation von Deformationsvorgängen. Es werden deshalb Auswerteverfahren angestrebt, die vorrangig folgende Aufgaben verfolgen (PFEUFER 1990):

- Auswertung großer Datenmengen verschiedenartiger (hybrider) Meßsysteme zur Erfassung der Ein- und Ausgangssignale eines dynamischen Systems
- Identifizierung des Systemverhaltens in Modellen, die dem überwachten Prozeß adäquat sind
- Bearbeitung von Störeinflüssen durch Filterung
- Vorhersage der Systemreaktion beim Vorliegen „normaler" Einflüsse
- Abschätzung des Objektverhaltens bei Einwirkung extremer Einflüsse
- Ermittlung der Anteile der einzelnen Einflußgrößen an der Gesamtreaktion (-deformation)
- Ermittlung der Haupteinflußgrößen
- Möglichkeiten zur Steuerung des Deformationsprozesses über beeinflußbare Einflußgrößen
- Optimierung des Meßaufwandes anhand der gewonnenen Erkenntnisse
- umfassende Interpretation der Überwachungsergebnisse durch überschaubare und physikalisch begründete Parameter des analysierten Prozesses.

Da vielfach nur geringe Kenntnisse über die inneren und äußeren Zusammenhänge eines ablaufenden Deformationsprozesses vorliegen, ist ein allgemeingültiges Schema zur Analyse der verschiedensten Untersuchungsobjekte durch ein universelles Modell mit bestimmten, wiederkehrend zu benutzenden Methoden nicht denkbar. Die Modellklassen der Struktur- und der Verhaltensmodelle bieten jedoch die Möglichkeit, eine große Vielfalt von Prozessen sachgerecht bearbeiten zu können (NATKE 1983). Die Entwicklungen auf diesem Gebiet sind in den letzten Jahren erheblich vorangetrieben worden; dies wird sich in den kommenden Jahren fortsetzen.

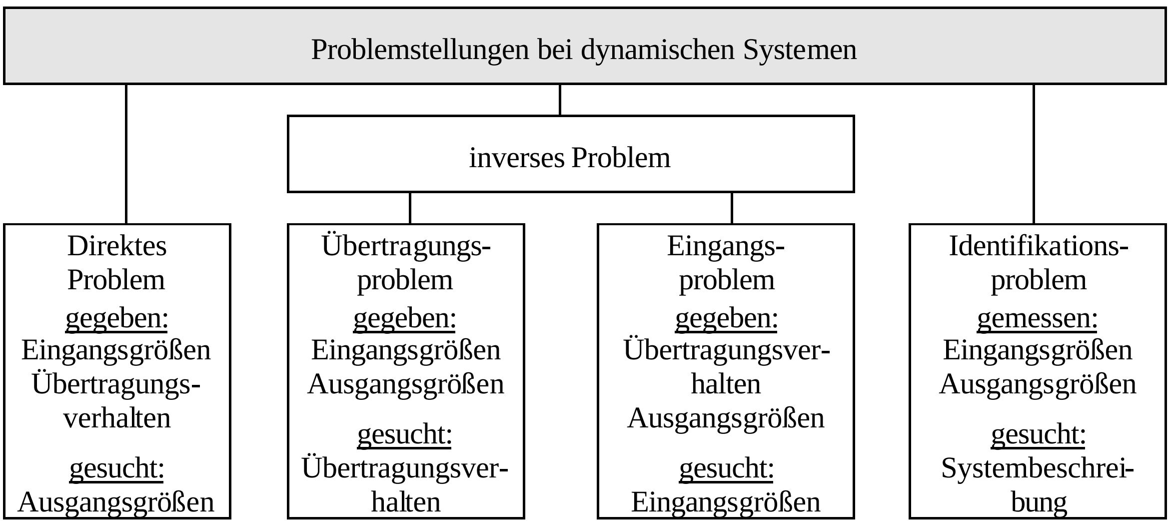

Abb. 6: Problemstellungen bei dynamischen Systemen

Wichtige Impulse sind in der letzten Zeit vor allem aus der Systemtheorie erwachsen. Überträgt man die dort entwickelten Gedankengänge, sieht man sich bei Überwachungsaufgaben mit den in Abb. 6 umrissenen grundlegenden Problemstellungen konfrontiert. Deren Umsetzung ist eine der Herausforderungen, die sich gegenwärtig stellen. Aus geodätischer Sicht ist das Identifikationsproblem der Regelfall, bei dem aus gemessenen Ein- und Ausgangsgrößen das Systemverhalten, das bei der direkten Problemstellung als bekannt vorausgesetzt wird, zu verifizieren ist. Invers wird die Aufgabenstellung, wenn entweder das Übertragungsverhalten oder die wirkenden Eingangsgrößen unbekannt sind. Die geodätisch zu erfassende Ausgangsseite liefert in diesen Fällen mitunter die einzigen Informationen für eine quantifizierbare Lösung des Problems (KERSTING 1992). Dieses Vorgehen wird auch als „reverse engineering" bezeichnet.

Systemidentifikation wird durchgeführt, um den physikalischen Zustand eines deformierbaren oder deformierten Körpers, die Spannungen, denen er unterliegt und – ganz allgemein - die Beziehung zwischen Belastung und Verformung zu bestimmen. Wenn diese Beziehung einmal ermittelt ist, kann das Ergebnis als sog. Systemgleichung als Grundlage für ein Prädiktionsmodell dienen. Durch den Vergleich der prädizierten Deformationen mit dem Ergebnis der geodätisch-geometrischen Analyse (Meßgleichung) wird ein besseres Verständnis des dynamischen Prozesses erreicht (Innovation, KALMAN-Filterung; HEUNECKE 1995, 1996). Auf diese Weise kann der Vermessungsingenieur entscheidend zu einer realistischen Interpretation des beobachteten Prozesses beitragen. Andererseits enthalten die von anderen Ingenieurdisziplinen entwickelten Systemmodelle wichtige Informationen für die Planung und Durchführung von Überwachungsmessungen und deren Auswertung. Unglücklicherweise ist dies Szenarium einer wirklich interdisziplinären Zusammenarbeit bei Entwurf und Durchführung einer Überwachungsaufgabe in der Praxis nicht sehr häufig. Die Gründe liegen darin, daß einerseits der Vermessungsingenieur die Methoden der Systemidentifikation nur unvollkommen beherrscht und daß andererseits auch die anderen Spezialisten mit den fortgeschrittenen geodätischen Analysemethoden nicht sehr vertraut sind (CHRZANOWSKI 1992). In den letzten Jahren kann man jedoch eine erfreuliche Entwicklung in der richtigen Richtung beobachten, wie häufige Beiträge zu Symposien und Kongressen und tiefschürfende und immer zahlreichere Doktorarbeiten beweisen.

Literaturhinweise

CHRZANOWSKI, A., CHEN, Y.Q. (1986): An Overview of the Physical Interpretation of Deformation Measurements. Deformation Measurements Workshop, Modern Methodology in Precise Engineering and Deformation Surveys. MIT, Massachusetts, pp. 207-220

CHRZANOWSKI, A., CHEN, Y.Q. (1990): Deformation Monitoring, Analysis and Prediction - Status Report. XIX. FIG Congress, Helsinki, Commission 6, Paper No. 604.1

CHRZANOWSKI, A., CHEN, Y.Q. (1992): Design, Monitoring, and Analysis of Deformation Surveys: Problems and Solutions. VI. Int. Symposium on Deformation Measurements, Hannover, pp. 145-160

ELLMER, W. (1987): Untersuchung temperaturinduzierter Höhenänderungen eines Großturbinentisches. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Nr. 26, Neubiberg

HEINE, K. (1999): Zur Analyse und Identifikation dynamischer Deformationsprozesse durch Ein-Ausgangs-Modelle. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, DGK Reihe C, in print

JAEGER, R., HAAS, U., WEBER, A. (1997): Ein ISO 9000 Handbuch für Überwachungsmessungen. Schriftenreihe des Deutschen Vereins für Vermessungswesen Nr. 27, S. 415-427, K. Wittwer

HEUNECKE, O. (1995): Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver Kalman-Filterung (Hannoversches Filter). Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 208, Hannover

HEUNECKE, O. (1996): Einige Gedanken zur fachübergreifenden Untersuchung von Deformationsvorgängen, dargestellt am Beispiel der Filterung einer Biegelinie eines Pylons. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 209, S. 5-92, Hannover

HEUNECKE, O., PELZER, H. (1998): A new Terminology for Deformation Analysis Models based on System Theory. In: KAHMEN, H. / BRÜCKL, E. / WUNDERLICH, T. (eds.): Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Eisenstadt, pp. 285-292

HEUNECKE, O., PELZER, H., WELSCH, W. (1998): On the Classification of Deformation Models and Identification Methods in Engineering Surveying. XXI. FIG Congress, Commission 6, Brighton, pp. 230-245

KERSTING, N. (1992): Zur Analyse rezenter Krustenbewegungen bei Vorliegen seismotektonischer Dislokationen. Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Nr. 42, Neubiberg

LEVENHAGEN, J. (1998): Identifikation synthetischer dynamischer Übertragungsmodelle und ihre Störungen im Zeitbereich. Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Nr. 83, Bonn

MILEV, G., PAPO, H. (1998): Classification of methods and models for determination, analysis and interpretation of deformations. XXI. FIG Congress, Commission 6, Brighton, pp. 193-201

NATKE, H.G. (1983): Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse. Verlag Friedrich Vieweg u. Sohn, Braunschweig - Wiesbaden

PFEUFER, A. (1990): Beitrag zur Identifikation und Modellierung dynamischer Deformationsprozesse. Vermessungstechnik 38, S. 19-22

PFEUFER, A. (1993): Analyse und Interpretation von Überwachungsmessungen - Terminologie und Klassifikation. Zeitschrift für Vermessungswesen 118, S. 470-476

STROBEL, H. (1975): Experimentelle Systemanalyse. Akademie-Verlag, Berlin

WELSCH, W. (1981): Gegenwärtiger Stand der geodätischen Analyse und Interpretation geometrischer Deformationen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 88, S. 41-51

WELSCH, W. (1996): Geodetic analysis of dynamic processes: classification and terminology. 8th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Hong Kong, pp. 147-156

WELSCH, W., HEUNECKE, O., KUHLMANN, H. (1999): Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Wichmann Verlag, Heidelberg

WERNSTEDT, J. (1989): Experimentelle Prozeßanalyse. R. Oldenbourg Verlag, München-Wien